

# Study on the variability of the Jovian Io plasma torus using ground-based observations of sulfur ion emissions

著者	野澤 宏大
号	45
学位授与番号	1935
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/38945">http://hdl.handle.net/10097/38945</a>

氏名・(本籍)	の ざわ ひろ まさ 野 澤 宏 大
学位の種類	博士(理学)
学位記番号	理博第1935号
学位授与年月日	平成14年3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科, 専攻	東北大学大学院理学研究科(博士課程)地球物理学専攻
学位論文題目	Study on the variability of the Jovian Io plasma torus using ground-based observations of sulfur ion emissions (硫黄イオン輝線観測に基づく木星イオプラズマトーラスの変動に関する研究)
論文審査委員	(主査) 教授 森 岡 昭 教授 岡 野 章 一, 福 西 浩, 小 野 高 幸 助教授 三 澤 浩 昭

## 論 文 目 次

Acknowledgements	i
Abstract	iii
1 Introduction	1
1.1 Io	1
1.2 The Io Plasma Torus	4
1.3 Purpose of This Thesis	17
2 Instrumentation and Observation	19
2.1 Instrumentation	19
2.1.1 Telescope	19
2.1.2 CCD Camera	21
2.1.3 Back Optics	22
2.1.4 Estimation	34
2.2 Observation	37
3 Data Reduction	43
3.1 Image Reduction	43
3.1.1 General Reduction	43
3.1.2 Scattered Light Subtraction	48
3.2 Intensity Calibration	51
3.3 Position Calibration	54
4 Observational Results	57
4.1 Intensity Variations	57

4.1.1 System III Variation	57
4.1.2 Long Timescale Variation	67
4.2 Dawn-Dusk Asymmetry	70
4.3 Radial Profile	75
4.4 Electron Density	81
5 Periodicity Analysis	87
5.1 Periodicity Longer than System III	87
5.2 Periodicity Search Method	89
5.3 Results	92
6 Discussions	111
6.1 Intensity Variation	111
6.2 Dawn-Dusk Asymmetry	118
6.3 Radial Profile	119
6.4 Electron Density	120
6.5 10.2 Hours Periodicity	121
6.6 Support data for Haleakala Observation	128
6.7 Future Plan	128
7 Conclusions	131
References	135
A	141
A.1 CML	141
A.2 The Io Phase Angle	142
A.3 Plasma Supply Rate from Io	143

## 論文内容要旨

太陽系最大の惑星・木星は強い固有磁場と高速自転により特徴付けられる強大な磁気圏を形成しており、地球の磁気圏とは異なる様相を呈している。その中で、 $5.9 R_J$  ( $R_J$ : 木星半径) に位置する衛星イオの存在は木星磁気圏の電磁環境に多大な影響を与えている。イオには多数の活火山が存在し、火山性ガス（主成分：硫黄酸化物）は木星磁気圏の主なプラズマ源となっている。イオから放出されたガスは磁気圏内でイオン化され、磁場の束縛の元で運動し、木星内部磁気圏にはイオプラズマトーラスと呼ばれる高密度のプラズマ雲を形成する。このプラズマトーラス内のイオンは電子衝突励起により、様々な波長で発光しており、地上観測も可能となっている。

イオプラズマトーラスの光学観測は、地上から木星磁気圏プラズマ環境を探る数少ない手法である。プラズマトーラス中のイオンの発光は、可視波長域では $S^+$ イオンの禁制線（以下[SII]；波長673.1, 671.6 nm）が特に観測しやすく、これまで多くの研究者によって観測されてきた。しかし、それらの多くは限られた短期間の観測であり、長い期間での時間変動を検出し、トーラスプラズマのダイナミクスを議論するに足る観測はほとんど行われてこなかった。我々は、このプラズマトーラスの発光を長期間にわたり観測し、磁気圏プラズマの供給、損失、及び輸送過程を探ることを目的として、可搬型の望遠鏡装置を開発しイオプラズマトーラスの撮像観測を行ってきた。その間、観測器機の改良、解析・校正方法の

確立を行い、ほぼ一様な基準で比較しうる4年にわたるデータを取得するに至った。我々が特に注目しているのは、プラズマトーラスの発光強度及び空間構造に見られる変動現象である。

本研究で我々が抽出しているプラズマトーラスの発光強度とは、[SII] 発光の中で一般に最も明るい領域であるribbonと呼ばれる領域周辺の強度である。過去4年間の[SII] 673.1 nm発光の観測から、プラズマトーラスの構造とダイナミクスに関して以下のような結果が得られた。

- (1) イオプラズマトーラスの外形はSystem IIIに固定されているが、[SII]発光強度自体にはSystem III経度 ( $\lambda_{III}$ )依存性は見られない。
- (2) System III経度 $120^\circ$  から $180^\circ$  の領域で突発的な増光が時折存在する。
- (3) [SII]の発光強度には、日々（木星数自転程度の時間幅）の変動がある。
- (4) [SII]の発光強度は年を追う毎に緩やかな減少を示し、2000–2001年の観測では特に大幅な強度減少が確認された。
- (5) 発光強度とribbon位置の両者にdawn-dusk非対称性が確認された。ribbonは各年を通じてdawn側の方がdusk側に比べて、0.2  $R_J$ 程度外側に位置していた。
- (6) [SII]発光の平均的な動径方向分布は年々変化を示す。1998年及び1999年の観測時にはribbon位置に強度のピークが存在したが、2000–2001年度には、ribbon位置とその内側（cold torus）の2つのピークが確認された。
- (7) [SII] 673.1 nmと[SII] 671.6 nmの強度比から、平均的な電子密度分布の推定を行った。その結果、観測された[SII] 673.1 nmの発光強度減少に伴い、電子密度も減少していることが確認された。
- (8) Lomb-Scargle periodogramを用いた周期解析により、プラズマトーラス中の[SII] 673.1 nmの発光強度には約10.2時間の周期性が存在することが確認された。本研究では新たにSystem IV (2001) 経度を定義した。この経度により1998年から2000–2001年までの発光強度変動に共通する特性が確認された。

我々の観測結果から、トーラス内のプラズマ環境が、短期及び長期の両方の時間スケールで大きく変動していることが示された。特に2000–2001年の観測時には、大きな変化があったことが示された。観測結果に基づいた考察から、以下の結論が導かれた。

- (1) イオプラズマトーラス内の[SII] 673.1 nm発光強度にはSystem III依存性はなく、System IIIよりやや遅れた、約10.2時間の周期性が存在する。
- (2) 突発的な増光現象はSystem III–System IVダイアグラムにおいて、特定の狭い領域に限られて存在している。この増光は、System IIIの9.925時間周期とSystem IVの10.2時間周期の会合周期に関連すると考えられる。しかしこれは必要条件であり、実際にはさらに何らかの付加条件に伴いこの増光が発生すると考えられる。
- (3) 発光強度の長期変動から、イオからのプラズマ供給に関して、定常的な供給と突発的な供給の2つの成分が存在する。
- (4) [SII]の平均発光強度が示す年々緩やかな減少から、最近4年間はイオの火山活動が静穏な状況に向かいつつあったことが示唆される。
- (5) 平均強度と密度一様モデルに基づいて求められるトーラス全域での[SII] 673.1nm発光の放射エネルギーは $10^{10}$  Wオーダーである。
- (6) dawn-to-dusk電場の規模は、発光強度の大幅な変動にもかかわらず、観測装置の空間分解能の範囲で一定である。

- (7) [SII]発光の動径方向分布は、ribbon位置付近で特に激しく変化する。この事実は、今後トーラス内でのプラズマの物理的な輸送・拡散過程を考えていく上で重要な手がかりとなる。
- (8) [SII]の2波長強度比から推定された2000–2001年の電子密度からは、実際の観測で得られた[SII]発光強度を説明することが出来ない。この原因として高温電子の励起への寄与が示唆される。
- (9) 本研究では10.2時間周期の物理的な説明は提唱されていないが、この周期性は木星固有に存在するSystemによるもの（System IV）であると考えるのが適当であると結論される。

## 論文審査の結果の要旨

木星の衛星イオから放出される火山性ガスは、木星磁気圏の荷電粒子との衝突あるいは光電離によりイオン化され、木星内部磁気圏領域にプラズマトーラスを形成している。このプラズマトーラス域は木星磁気圏の重イオンの主源になっており、木星磁気圏の電磁環境に大きく関わっている。また、プラズマトーラス中のイオンは電子衝突により励起され、様々な波長で発光する。したがって、イオプラズマトーラスのプラズマを光学的手段によって観測することにより、木星磁気圏のプラズマ源とそのダイナミックスに関する知見を得ることができる。

野澤宏大提出の論文は、このような観点にたち、観測装置の開発・製作、海外へ赴いての観測、観測データの解析手法の確立、及びデータ解析によるイオプラズマトーラスの変動過程の研究を行ったものである。

観測装置の開発・製作では、対象とするイオン発光を硫黄イオン禁制線（673.1, 671.6nm）とし、観測目的を満たす可搬型の望遠鏡観測装置を開発し、従来の研究ではなし得なかった光学観測最適地での長期連続観測を可能にした。

観測は、観測条件の最適地であるオーストラリア砂漠及びハワイ山頂において4年間（各年1～2月間）にわたって実施し、良質・豊富なデータを取得した。同時に観測データの解析手法を独自の工夫により確立し、信頼性の高いデータ解析を可能とした。

これらの周回なステップを踏んで得られたデータの解析から、プラズマトーラスの長期・短期発光変動の検出、トーラス形状のdawn-dusk非対称性の特性、トーラス動径方向の分布とその変動、電子密度分布の導出等、トーラスプラズマの動態に関する新しい成果を得た。さらにトーラスプラズマの周期性について詳細な検討を行い、トーラス発光の変動はSystem III周期成分を持たず、System IV周期によることを明らかにした。

以上のように、本博士論文の研究から明らかにされたプラズマトーラスの特性は、木星磁気圏におけるプラズマ源とその変動を究明する研究に大きく貢献するもので、著者が自立して研究活動を行うに必要な高度な研究能力と学識を有することを示している。よって、野澤宏大提出の論文は、博士（理学）の学位論文として合格と認める。